สหัส พรหมสิทธิ์

โลกของควอนตัม กับเซมิคอนดักเตอร์

ความสัมพันธ์ของทฤษฎีควอนตัมกับผลิตภัณฑ์ในโลกของคอมพิวเตอร์

โลกของเซมิคอนดักเตอร์สำหรับในอนาคตอันใกล้นี้มีอันที่จะต้องเข้าไปเกี่ยวข้องกับพฤติภาพการทำงานของอนุภาคที่เล็กมาก ๆ ที่อยู่ในรูปของอะตอม อิเล็กตรอน ฯลฯ หรือที่เรียกว่า โลกของควอนตัม (quantum world) ซึ่งก่อนที่จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของทฤษฎีควอนตัมกับผลิตภัณฑ์ในโลกของคอมพิวเตอร์ เช่น ควอนตัมชิพ (quantum chips) รวมทั้งการสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์โดยอาศัยโมเลกุลมาเรียงกันเป็นชั้น ๆ ก็จะย้อนกลับไปทบทวนสิ่งที่เป็นพื้นฐานของควอนตัมสักเล็กน้อยว่า ทฤษฎีควอนตัมได้มีมาตั้งแต่ในราวหลังปี 1920 และได้เป็นที่ยอมรับกันว่าเป็นทฤษฎีที่ประสพความสำเร็จมากที่สุดในโลกของวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ เพราะสามารถเข้าไปอธิบายความเร้นลับซับซ้อนในหลาย ๆ เรื่องให้เกิดความกระจ่าง นับตั้งแต่เรื่องของเคมี (เช่นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับธรรมชาติของ chemical bonds) จนถึงพฤติภาพของอนุภาคที่เป็นอนุปรมาณู โดยที่ทฤษฎีควอนตัมสามารถให้การพยากรณ์ความเป็นไปของพฤติภาพดังกล่าวได้อย่างแม่นยำ เมื่อได้มีการทดสอบผลของการพยากรณ์เพื่อใช้ในการยืนยันความแม่นยำของทฤษฎีอันนี้แบบซ้ำแล้วซ้ำเล่า ทฤษฎีหนึ่งนี้ถือว่าเป็นแกนอันสำคัญในโลกของควอนตัมก็คือหลักแห่งความไม่แน่นอนของไฮเซ็นเบิร์ก (Heisenberg's uncertainty principle) ซึ่งมีใจความว่า "ถ้าท่านรู้ความเร็วของอนุภาคควอนตัม ท่านจะไม่สามารถรู้ถึงตำแหน่งที่แน่นอนของมัน" อันหมายถึงการที่มนุษย์ไม่สามารถหยั่งรู้บางลักษณะของธรรมชาติได้อย่างชัดเจน หากจะอาศัยแค่เพียงทฤษฎีควอนตัมที่มีผู้สร้างขึ้นมาเพื่อให้อรรถาธิบายสิ่งที่เป็นวัตถุธรรมในระดับปรมาณู อันอาจต้องอาศัยการค้นพบที่ยิ่งใหญ่นับเป็นอันดับสองที่เกิดภายหลังทฤษฎีควอนตัมเข้าช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์นั่นก็คือ ทฤษฎีเคออส (chaos theory) ซึ่งได้มีผู้ให้ความสนใจมาตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 17 (Leibuitz) และในคริสต์ศตวรรษที่ 19 (Poincare) จนกระทั่งมาบูมในหลังปี 1980 เมื่อนักวิทยาศาสตร์เริ่มเห็นว่าเคออส (chaos) นั้นสามารถแฝงตัวอยู่ในปรากฏการณ์หลายอย่างเช่น การเติบโตของประชากร พลศาสตร์ของดาวนพเคราะห์ (planetary dynamics) จนถึงระบบภูมิอากาศ จนกระทั่งได้มีการก่อตั้งแนวคิดใหม่ที่รวมทฤษฎีควอนตัมและทฤษฎีเคออสเข้าช่วยกันในรูปของควอนตัม เคออส (quantum chaos) ซึ่งนักวิจัยในปัจจุบันเห็นว่าจะเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นเซมิคอนดักเตอร์ในอนาคต สำหรับในขณะนี้ยังถือว่าทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในซิลิคอนชิพนั้นยังมีขนาดใหญ่พอที่อิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านเข้าไปในทรานซิสเตอร์ได้อย่างสบาย เหมือนสภาวะของโมเลกุลที่อยู่ภายในสารที่เป็นก๊าซที่ไม่มีการเบียดเสียดยัดเยียดกันแต่อย่างใด จากจุดนี้ก็จะขอก้าวเข้าสู่เรื่องของปัญหาในการผลิตชิพในยุคต่อไป

ควอนตัม-บิลเลียด-บอลล์

ในขณะที่ผู้ผลิตชิพพยายามที่จะเพิ่มจำนวนลอจิกเกต (logic gates) เข้าไปในซิลิกอนด้วยการบรรจุเกตดังกล่าวเข้าไปให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้นั้น ก็มีผู้คาดกันว่าในราว 15 ปีนับจากนี้ทรานซิสเตอร์จะมีขนาดเล็กจนกระทั่งอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าไปในนั้นมีพฤติภาพที่เหมือนควอนตัมบิลเลียดบอลล์ (quantum billiard balls) ตรงจุดนี้เองที่ต้องอาศัยหลักของควอนตัมเคออส (quantum chaos) มาอธิบายว่าอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ที่จะนำมาใช้ในโลกของคอมพิวเตอร์ในอนาคตนั้นทำงานอย่างไร โดยจะเริ่มด้วยความเป็นมาของคำว่าควอนตัม-บิลเลียด ซึ่งก็จะต้องพาผู้อ่านไปดูการทดลองของนักฟิสิกส์ผู้มีนามว่า ลอเร็นซ์ อีฟ (Laurence Eaves) พร้อมด้วยทีมงานของเขาที่มหาวิทยาลัยน้อตติ้งแฮม และที่มหาวิทยาลัยโตเกียว

อีฟ (Eaves) ได้ทำการทดลองในรูปของการเล่นเกมที่เรียกว่า ควอนตัม-บิลเลียด (quantum billiards) โดยอาศัยเซมิคอนดักเตอร์แซนด์วิชที่มีความซับซ้อน ลูกบอลล์ที่เขาใช้ในกรณีนี้ก็คืออิเล็กตรอน ส่วนอุปกรณ์ที่จะทำหน้าที่เป็นกันชนก็คือ เครื่องกีดขวางในรูปของควอนตัมแบเรียร์ (quantum barrier) กับสนามแม่เหล็ก ควอนตัมแบเรียร์ ซึ่งเป็นเสมือนส่วนหนึ่งของขอบโต๊ะบิลเลียดที่สร้างขึ้นมาโดยอาศัยแนวชั้นนอกของแซนด์วิชให้ทำหน้าที่เหมือนกำแพงที่ใช้สำหรับสะท้อนอิเล็กตรอน นอกจากนี้ก็ยังมีขอบของโต๊ะบิลเลียดอันเป็นส่วนที่เหลือ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กที่ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเป็นเส้นโค้งที่มีความซับซ้อนที่ได้มีการหวังกันว่าไดนามิกที่มีผลของการทดลองนี้น่าจะมีพฤติภาพเป็นเคออส (chaos) การทดลองของอีฟต้องการสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มที่สูงเป็นพิเศษ อันทำให้เขาต้องนำอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองไปทำการทดลองที่ห้องทดลองที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงที่มหาวิทยาลัยโตเกียว อันเป็นเพียงไม่กี่แห่งในโลกที่มีอุปกรณ์สร้าง

สนามแม่เหล็ก (pulsed magnetic fields) ที่มีอานุภาพที่สุด ในขณะที่อีฟทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยโตเกียวนั้น ทีมงานของเขาที่อยู่ที่น้อตติ้งแฮมก็ได้ดำเนินการในด้านทฤษฎีควบคู่กันไป โดยทำการคำนวณกันยกใหญ่ชนิดที่ต้องอาศัยนักคำนวณถึงสามคน ส่วนหลักเกณฑ์ในการคำนวณเพื่อที่จะใช้ยืนยันการทดลองที่โตเกียวนั้นก็ได้อาศัยหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ของกลศาสตร์ของควอนตัม ผลการทดลองของเรื่องนี้ที่ได้ลงพิมพ์ในวารสาร Nature เมื่อเมษายน 1996 โดยสรุปได้ว่าทุกอย่างได้เป็นไปตามการพยากรณ์ในด้านกลศาสตร์ของควอนตัมว่าไว้ นั่นก็คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้เกิดจากอิเล็กตรอนที่วิ่งไปตามเส้นทาง ซึ่งสามารถพยากรณ์ได้โดยทางคำนวณ โดยมีโครงสร้างที่เรียกว่า "scars" ซึ่งหมายถึงว่าคลื่นของอิเล็กตรอนจะมีการเดินทางที่มุ่งเน้นไปที่เส้นทางต่าง ๆ ที่สามารถคาดคะเนได้ (waves concentrate along particular paths) อันจะเหมือนกับผลของการทดลองที่มีผู้ทำไว้ในปี 1992 เพื่อพิสูจน์คอนเซ็ปต์ของควอนตัมบิลเลียด จากนี้ก็จะขอกลับเข้าสู่ปัญหาในทางปฏิบัติในเรื่องของทฤษฎีควอนตัมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างคอมพิวเตอร์แบบทีละโมเลกุล ภายหลังที่ได้พูดถึงพฤติกรรมอันประหลาดของควอนตัมเพื่อเป็นการปูพื้นมาตั้งแต่ต้น

ควอนตัมคอนไฟน์เม้นท์

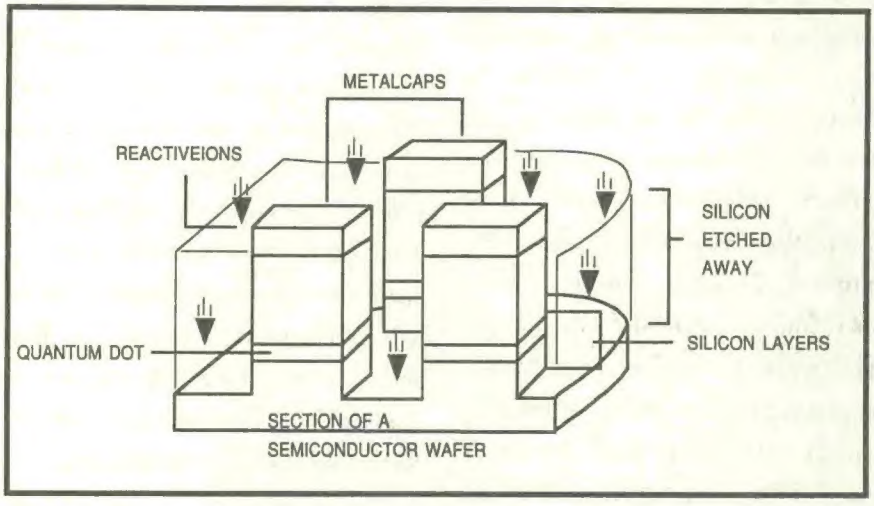
ในราวปี คศ. 2010 ความกว้างของเส้นทางภายในวงจรไอซีที่เกิดจากการกัดเซาะเข้าไปในเซมิคอนดักเตอร์ (semiconductors) จะแคบลงจะมีขนาดความกว้างน้อยกว่าหนึ่งในสิบของหนึ่งไมครอน กระแสไฟฟ้าที่วิ่งผ่านวงจรเหล่านี้จะมีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยมาก อันหมายความว่าในท่ามกลางของอิเล็กตรอนอันแสนเบาบางนี้ การเพิ่มหรือลดอิเล็กตรอนเพียงหนึ่งหรือสองตัวก็สามารถทำให้เกิดผลอันนี้เป็นข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด อันทำให้ผู้ผลิตชิพต้องหันมาสนใจโลกของควอนตัมมากขึ้น เช่นกรณีของ Texas Instruments Inc. ที่ได้ให้ความสนใจเรื่องนี้มานาน จนถึงกับได้มีการก่อตั้งแผนกนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics) ขึ้นมาพร้อมกับได้แต่งตั้งผู้จัดการให้รับผิดชอบในเรื่องของการนำเทคโนโลยีใหม่ล่าสุดนี้เข้าสู่สายการผลิตทางอุตสาหกรรมโดยเร่งด่วน ส่วนในแง่ของการค้นคว้าเพื่อกรุยทางไปสู่การผลิตทางอุตสาหกรรมก็ได้มีการแข่งขันกันอยู่หลายประเทศ เช่นที่มหาวิทยาลัยวิสคอนซันก็มีนักวิทยาศาสตร์ในด้านวัสดุผู้มีนามว่า แม็กซ์ จี. ลากัลลี่ (Max G. Lagally) ที่ให้ความเห็นว่าขณะนี้โลกของการค้นคว้าในด้านวัสดุกึ่งตัวนำกำลังมาถึงจุดที่เป็นด่านสุดท้ายที่มีความยิ่งใหญ่และท้าทายในด้าน solid-state physics ผลของการค้นคว้าวิจัยของลากัลลี่ได้ทำให้เกิดมีสิ่งที่เรียกว่า ควอนตัม-ดอต (quantum dots) ขึ้นมาซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กที่สุด (smallest electronic structures) เท่าที่นักวิทยาศาสตร์จะสามารถนึกภาพได้ อันจะทำให้มนุษย์สามารถสร้างชิพ (chips) และลำแสงเลเซอร์ (lasers) ที่มีขนาดเล็กจนนึกไม่ถึง แต่มีอานุภาพที่สูงมาก เมื่อโลกก้าวสู่คริสต์ศตวรรษที่ 21 ความเล็กของควอนตัม-ดอตนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายกว่า เราสามารถนำจุดเล็ก ๆ ที่เป็นควอนตัม-ดอต นับเป็นจำนวนพันล้านจุดไปวางไว้บนหัวเข็มหมุดได้ โดยไม่เบียดเสียดกัน ประโยชน์ของควอนตัม-ดอตก็คือ การทำหน้าที่เป็นทรานซิสเตอร์ที่จะสวิตช์เพื่อเปิดหรือปิด โดยอาศัยการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียว นอกจากนี้นักวิทยาศาสตร์ยังสามารถหาวิธีในการจัดเรียง

ควอนตัม-ดอตให้อยู่ในรูปของกลุ่มก้อนที่ทำหน้าที่เป็นคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเท่าปรมาณูได้โดยไม่ยากนัก

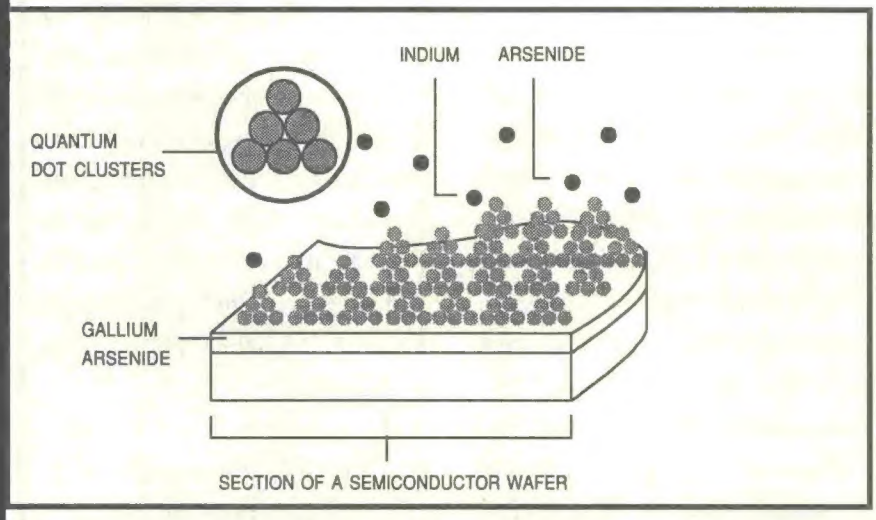
การค้นคว้าเท่าที่ดำเนินอยู่ในขณะนี้ในเรื่องของควอนตัม-ดอตต้องอาศัยวิทยาศาสตร์ขั้นพื้นฐานที่เป็นระยะยาวเข้าช่วย อันหมายถึงว่าผู้ค้นคว้าและผู้ที่เกี่ยวข้องในด้านนี้ต้องมีความรู้และความเข้าใจในเรื่องของฟิสิกส์ยุคใหม่ รวมทั้งคุณสมบัติใหม่ ๆ ของวัสดุต่าง ๆ และอุปกรณ์ในโลกของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในรูปของควอนตัมดีไวซ์ (quantum devices) ซึ่งแม้ว่าจะนำมาทำให้เป็นผลิตภัณฑ์ไม่ได้ในขณะนี้ก็ตาม แต่มรรคผลของการค้นคว้าวิจัยที่ทำอยู่ในเมื่อไม่กี่ปีมานี้จนถึงปัจจุบัน จะมีผลกับอนาคตของเซมิคอนดักเตอร์อย่างมาก โดยเฉพาะในแง่ของการค้า อันทำให้ผู้ผลิตอุปกรณ์คอมพิวเตอร์รายใหญ่ เช่น Texas Instruments, IBM, Hewlett Packard และ Motorola ต่างมุ่งความสนใจไปที่งานค้นคว้าในด้านควอนตัมฟิสิกส์ด้วยการให้การสนับสนุนทางการเงินอย่างไม่อั้น เป้าหมายใหญ่ของการค้นคว้านี้ก็คือการหาทางควบคุมการเคลื่อนไหวของกลุ่มของอิเล็กตรอนที่เป็นกลุ่มเล็ก ๆ โดยไม่ให้ไปกระเทือนถึงคุณสมบัติที่เรียกว่า quantum effects ซึ่งทำได้ด้วยการสร้างสิ่งที่เรียกว่า ควอนตัม-ดอต ขึ้นมาในทางปฏิบัติ ดอตต่าง ๆ เหล่านี้ก็คือกระจก (clumps) ของวัสดุที่มีความกว้างที่เล็กกว่า 20 นาโนเมตร หรือ 20 ส่วนพันล้านเมตร ($20/_{10}9$) หรือเท่ากับความยาวของซิลิกอนอะตอมนับเป็นจำนวนราว 60 อะตอมที่นำมาเรียงกันเป็นแถว ซึ่งถ้าหากได้มีการสร้างกระจกหรือกลุ่ม (clumps) ที่เป็นควอนตัมโดยอาศัยปรมาณูที่มีคุณสมบัติอันเหมาะเจาะก็จะสามารถแปลงอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระให้เข้าไปอยู่ในกรงโดยจะหนีไปไหนไม่ได้ นอกจากจะมีพลังงานจากภายนอกที่มีปริมาณอันพอเหมาะพอดีมาทำหน้าที่เป็นแรงผลักดัน อันเป็นภาวะที่มีผู้เรียกว่าควอนตัมในสภาพกักขัง (quantum confinement) ที่เป็นบันไดไปสู่ปรากฏการณ์อันน่าสนใจและการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ที่ต้องอาศัยอุปกรณ์ผลิตลำแสงเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ และมีประสิทธิภาพสูงเช่นที่ใช้ในเครื่องเล่น CD, อุปกรณ์เช่นที่ว่านี้จะอาศัย quantum-well-lasers ที่สร้างขึ้นมาจากวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ที่เป็นแผ่นที่บางมาก ๆ โดยจะอยู่ระหว่างแผ่นวัสดุอื่นอีกสองชั้นที่ประกบอยู่ในรูปของแซนด์วิช อิเล็กตรอนที่อยู่ตรงกลางจะถูกกักอยู่เนื้อที่ที่มีความราบแบน (quantum flatland) ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้เพียงสองมิติ อันทำให้ง่ายต่อการป้อนพลังงานเข้าไปเพื่อสำหรับผลิตแสงเลเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะใช้พลังงาน (เช่นไฟฟ้า) น้อยลง จากนี้ก็จะพูดถึงงานค้นคว้าวิจัยที่ก้าวจากสองมิติไปสู่มิติเดียวในรูปของ quantum-wires ดังเช่นในกรณีของ Bell Lab ในสหรัฐฯ

ชิงเกิล-อิเล็กตรอนทรานซิสเตอร์

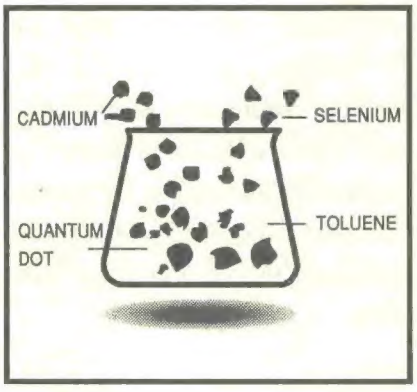
การค้นคว้าเพื่อก้าวลึกเข้าไปในโลกของควอนตัมจากภายในห้องทดลองที่โลกรู้จักดีก็คือที่ Lucent Technologies Inc., อันเป็นหน่วยงานหนึ่งของ Bell Lab. ของ AT&T ซึ่งได้มีนักวิทยาศาสตร์ผู้มีนามว่า ลอเร็น ไฟเฟอร์ (Loren Pfeiffer) เป็นหัวหน้าโครงการงานค้นคว้าวิจัยที่ไฟเฟอร์เป็นหัวหน้าทีมนี้ได้ก้าวจากโลกของสองมิติไปสู่มิติเดียวในรูปของ ควอนตัม ไวร์ (quantum wires) อันเป็นการทดลองเพื่อที่จะให้อิเล็กตรอนวิ่งได้ทางเดียว และได้ก่อให้เกิดผลออกมาในรูปของควอนตัมไวร์ เลเซอร์ซึ่งสามารถเปล่งแสงที่มีอานุภาพสูงกว่า ควอนตัมแวลล์เลเซอร์อันจะเป็นประโยชน์อย่างที่ไม่มีใครคาดถึงในโลกของการสื่อสารโทรคมนาคม เพราะเลเซอร์ที่มีกำลังแสงอันสูงนี้จะสามารถลดจำนวนรีพีตเตอร์ (repeaters) ได้มาก จากที่ต้องมีรีพีตเตอร์ในทุก ๆ 80 กม. (ประมาณ) ที่ทำหน้าที่รักษาความเข้มของสัญญาณเลเซอร์ภายในคอมมิวนิเกชันไลน์ที่อาศัยออปติคัลไฟเบอร์ อย่างไรก็ตาม การก้าวมาถึงขั้นของควอนตัมไวร์นี้ก็ยังไปไม่ถึงดวงดาวจนกว่าจะก้าวไปถึงขั้นของควอนตัม-ดอต ตามที่ได้อารัมภบทเอาไว้ตั้งแต่แรก สิ่งที่ท้าทายความสามารถของนักวิทยาศาสตร์และนักวิศวกรในอันดับต่อไปในเรื่องของควอนตัม-ดอตก็คือว่า ทำอย่างไรจึงจะสามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีความเล็กจนมองไม่



รูปที่ 1 แสดงการพิมพ์สี่เหลี่ยมของโลหะ (metal squares) ลงบนผิวของเซมิคอนดักเตอร์-เวเฟอร์ที่มีแผ่นบางของแกลเลียม-อาร์เซไนด์วางอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกอนในรูปของแซนด์วิช จากนั้นก็อาศัยไอออนให้ทำหน้าที่เซาะกัดเอาซิลิกอนให้หลุดออกไป (แต่จะไม่กัดเซาะส่วนที่เป็นโลหะ) จนทำให้เป็นชั้นของควอนตัม (quantum layer)



รูปที่ 2 แสดงการฉาบเซมิคอนดักเตอร์-เวเฟอร์ด้วยแกลเลียม-อาร์เซไนด์โดยการโปรยโมเลกุลของอินเดียม-อาร์เซไนด์ ซึ่งจะไปจับตัวกับแกลเลียม-อาร์เซไนด์ และทำหน้าที่เป็น seeds จำนวนโมเลกุลที่ถูกโปรยลงมาเรื่อย ๆ นี้จะทำให้เกิดเป็นกองของอนุภาคที่เรียกว่า cannonball piles อันเป็นการสร้างกลุ่มของ ควอนตัม-ดอต



รูปที่ 3 สารละลายโตลูอีน (toluene) สามารถละลายส่วนประกอบที่เป็นสารเซมิคอนดักเตอร์สองชนิด เช่น แคดเมียมกับเซเลเนียม จากนี้ก็เติมสารที่เป็นรีเอเยนต์ (reagent) ลงไปเพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายที่จะไปทำให้ควอนตัม-ดอต (quantum dots) เกิดความไม่บริสุทธิ์ จากนั้นก็ให้ความร้อนอย่างระมัดระวังเพื่อให้ปรมาณูราวสองสามตัวจับตัวกันอันจะทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดเล็กในรูปของควอนตัม-ดอต (quantum dots)

เห็นนี้ให้ได้คราวละมาก ๆ โดยต้องผลิตให้มีขนาดเท่า ๆ กัน ซึ่งสำหรับในขณะนี้ก็ทำได้สองทางคือ การกัดเซาะเข้าไปในเซมิคอนดักเตอร์ ดังในรูปที่ 1 และ 2 หรืออาจอาศัยวิธีเพาะผลึกของควอนตัม-ดอตในหลอดทดลองทีละโมเลกุล ดังเช่นที่ Bell Lab ได้ริเริ่ม (รูปที่ 3) อันทำให้สามารถสร้าง light-emitting diodes ที่ปรับให้เป็นสีต่าง ๆ ได้

งานค้นคว้าที่น่าสนใจมาก ๆ อีกแนวหนึ่งก็คือการสร้าง ควอนตัมสตรักเจอร์ (quantum structures) จากโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ห้องทดลองทางเคมี James M. Tour ของมหาวิทยาลัยเซ้าท์แคโรไลน่าในสหรัฐฯ การค้นคว้าตามแนวนี้จะเป็นการพยายามบรรจุอุปกรณ์ที่มีขนาดเท่าโมเลกุล นับเป็นจำนวนล้านล้าน (trillions) โมเลกุลลงในพื้นที่หนึ่งตารางมิลลิเมตร อันจะมีจำนวนทรานซิสเตอร์ที่มากกว่าที่มีอยู่ในชิพในปัจจุบันถึง 10,000 เท่า

อย่างไรก็ตาม สำหรับในโลกของคอมพิวเตอร์ก็ยังมีความเชื่อมั่นว่าความสามารถของควอนตัม-ดอตในอันที่จะจับและยึดกักอิเล็กตรอนไว้ให้ได้นั้นยังเป็นของจำเป็นสำหรับการคำนวณที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนที่มีลักษณะเดี่ยว โดยซิงเกิลอิเล็กตรอนทรานซิสเตอร์ (single electron transistors) จะ "อ่าน" สิ่งที่อยู่ในดอตด้วยการหยั่งวัดสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่ถูกเก็บกักไว้ อันเป็นแนวความคิดที่เอามาจากงานค้นคว้าของนักฟิสิกส์ผู้มีนามว่า คอนสแตนติน เค. ไลกาเรฟ (Konstantin K. Likhalev) ซึ่งประจำอยู่ที่มหาวิทยาลัยแห่งนิวยอร์คที่สโตนนี่บรู๊ค นักฟิสิกส์ผู้นี้ได้สร้างแบบจำลองของแมมโมรีชิพโดยอาศัยควอนตัมสตอเรจ ดอต อันทำให้เขาสามารถออกแบบสิ่งที่บรรจุข้อมูลได้ในระดับเทราบิต (terabit) หรือในระดับ 10^{12} บิต ซึ่งจุทรานซิสเตอร์ได้มากกว่าในปัจจุบันถึง 15,000 เท่า ภายในเนื้อที่ที่เท่ากัน อันทำให้มีการนำแบบจำลองของไลกาเลฟไปใช้สร้างทรานซิสเตอร์แบบอิเล็กตรอนเดียวอยู่หลายทีมงานด้วยกัน เช่นที่ห้องทดลองในมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ซึ่งได้รับการสนับสนุนทางการเงินจากฮิตาชิที่ได้ประกาศออกมาเมื่อปี 1993 ว่าได้สร้างเมมโมรีดีไวซ์แบบที่เป็นซิงเกิลอิเล็กตรอนในชั้นทดลองได้สำเร็จ และได้นำซิงเกิลอิเล็กตรอนลอจิกสตรักเจอร์ (single electron logic structure) ออกเปิดเผยเมื่อเดือนกรกฎาคม 1995 ปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับควอนตัมดีไวซ์ (quantum devices) ซึ่งรอให้นักวิทยาศาสตร์ค้นคว้าพัฒนาเพื่อหาทางแก้ไขนั้นยังคงมีอยู่ เช่น การต้องทำงานในอุณหภูมิที่ต่ำมาก ๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ที่ห้องทดลองของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดก็สามารถสร้างซิงเกิลอิเล็กตรอนทรานซิสเตอร์ที่ทำงานที่อุณหภูมิห้องได้สำเร็จ ปัญหาต่อไปก็คือเรื่องของสวิตชิงสปีด (switching speeds) ที่ยังต่ำอยู่อันเนื่องมาจากการที่อิเล็กตรอนเดี่ยว ๆ ถูกกระแสไฟฟ้าที่หลงมาจากที่อื่นรบกวน เมื่อเป็นเช่นนี้การพัฒนาเพื่อหาทางออกแบบคอมพิวเตอร์ให้ทำงานในรูปของควอนตัมจึงต้องก้าวต่อไปอีกโดยหันไปมองวิธีอื่น ซึ่งต้องการวิสัยทัศน์ที่กว้างขึ้นไปอีก ดังเช่นกรณีของเครก เอส. เล้นท์ (Craig S. Lent) แห่งมหาวิทยาลัยโนเตอร์เคมในสหรัฐฯ

เล้นท์กับเพื่อนร่วมงานที่เป็นนักทฤษฎีที่ชื่อว่า วอล์ฟแกง โปรอด (Wolfgang Porod) ได้เสนอแนวความคิดอันใหม่ที่มีส่วนประกอบขั้นพื้นฐานที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ซึ่งมีควอนตัม-ดอตอยู่ 4 ชุด และเพื่อเพิ่มอิเล็กตรอนเข้าไปสองตัวก็จะทำให้ควอนตัม-ดอตรับเปลี่ยนมุมอันเป็นที่อยู่บนสี่เหลี่ยมนี้จึงสามารถมีอิเล็กตรอนปรากฏได้อยู่สองแบบคือ อิเล็กตรอนที่อยู่บนมุมซ้ายบนและมุมขวาล่าง หรือขวาบนและซ้ายล่าง อันเป็นความต้องการในแง่ของสวิตช์ซึ่งสามารถที่จะสวิตช์ไปมาได้โดยอาศัยการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสี่เหลี่ยมอื่น ๆ ซึ่งอยู่ถัดไป อันแสดงถึงการสามารถนำ "สี่เหลี่ยม" ต่าง ๆ มาจัดให้อยู่ในรูปที่เรียนแบบการทำงานของลอจิกฟังก์ชัน (logic functions) ทุกอันที่ไว้ในการคำนวณ ซึ่งสำหรับในขณะนี้ผลงานค้นคว้าของเล้นท์และทีมงานยังจัดอยู่ในขั้นต้นเท่านั้น นั่นก็คือการสร้างดอต (dots) ขึ้นมาเป็นคู่เพื่อพิสูจน์ "ฟิสิกส์" ในด้านนี้ก่อนที่จะทดลองขั้นต่อไป ซึ่งก็คงต้องรอไปอีกสักพักก่อนที่มนุษย์จะสามารถสร้างควอนตัมชิพ จนถึงยุคที่มนุษย์สามารถมีซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่ตั้งอยู่บนหัวเข็มหมุด และทั้งหมดนี้จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อมนุษย์สามารถนำเอาคอนเซ็ปต์ต่าง ๆ จากวิทยาศาสตร์ของควอนตัมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ให้มากที่สุดในแง่ของ quantum communication กับ quantum computing ซึ่งก่อนจบก็จะขอกล่าวถึงเรื่องที่น่าจะมีความสำคัญมากอีกเรื่องในโลกของควอนตัมนั่นก็คือ ควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำการคำนวณในเกือบจะทุกอย่างได้ในเวลาเดียวกัน (would in a seuse be doing all calculations at the same time)

Quantum parallelism

คอมพิวเตอร์โดยทั่วไปจะอาศัยเลข 1s หรือ 0s เพื่อแสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าอยู่หรือไม่และอาศัยลอจิกเกตที่ประกอบจากทรานซิสเตอร์ สำหรับการคำนวณอันซับซ้อนที่มีการปั๊มดิจิตต่าง ๆ ให้ผ่านไปในเกตเป็นจำนวนมากมาย ข้อแตกต่างของควอนตัมคอมพิวเตอร์ก็คือการสามารถประมวลผลเลข 1s กับ 0s ในสภาวะที่ซ้อนทับกันได้ในรูปของ superpositions กล่าวคือ ข้อมูลที่เป็นอินพุตจะได้รับการแปลงให้อยู่ในรูปของ superpositions และทำการประมวลด้วยควอนตัมลอจิกเกต ซึ่งก็จะให้ผลออกมาในรูปของ superposition ของคำตอบทุกคำตอบที่เกิดจากการคำนวณที่ว่าเป็นไปได้ อันทำให้ดูเหมือนว่าควอนตัมคอมพิวเตอร์สามารถทำการคำนวณในเกือบทุกอย่างอย่างพร้อม ๆ กัน จนเป็นที่มาของคำว่า quantum parallelism ในมุมมองเช่นนี้โปรเซสเซอร์ที่สร้างจากควอนตัมลอจิกเกตจึงน่าจะมีประสิทธิภาพอย่างเหลือหลาย ที่สำคัญก็ถือว่าในปี 1994 ได้มีนักวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ของ Bell Lab (Peter Shor) ซึ่งได้สร้างอัลกอริธึมขึ้นมาอันหนึ่งที่เมื่อนำไปวิ่งในควอนตัมคอมพิวเตอร์ก็จะสามารถแยกแฟคเตอร์ของจำนวนเลขที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ได้ในชั่วพริบตา การค้นพบอัลกอริธึมของปีเตอร์ ชอร์ จึงเป็นเสมือนแรงขยั่วให้มีการค้นคว้าวิจัยในด้านควอนตัมคอมพิวเตอร์กันอย่างขนานใหญ่ ทั้งในสหรัฐฯ ยุโรป และอีกหลายประเทศ เพื่อก้าวไปสู่ยุคของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเล็กจนไม่มีใครคาดคิดมาก่อน

สัญลักษณ์คนดัง

คนมีสตังค์ทำอะไรก็น่ารัก คนกำลังดังทำอะไรก็น่าสนใจไปหมด ดังนั้นเราจึงมีความรู้สึกคุ้นเคยกับภาพของบุคคลต่าง ๆ ที่มีชื่อเสียง โดยพบเจอได้ในสื่อสิ่งพิมพ์ สื่อโทรทัศน์ วิทยุ และสื่อที่เผยแพร่เรื่องราวของผู้คนเหล่านั้นอีกแหล่งหนึ่งที่มีขนาดมหึมา นั่นก็คือ อินเทอร์เน็ต สื่อคอมพิวเตอร์ที่โยงใยไปทั่วโลก โดยมีการสร้างสัญลักษณ์เพื่อสื่อให้ทราบว่าใครเป็นใครกันมั่ง

5: -)	Elvis Presley
: -) B	Dolly Parton
: - O	Mick Jagger
: -.)	Madonna
: / 7)	Cyrano de Bergerac
)	Cheshire Cat
O -)	Cyclops
= I : -)	Abe Lincoln
: ' }	Richard Nixon
: (=)	Jimmy Carter
7 : ^]	Ronald Reagan
\ I = / /	George Bush
= : O]	Bill Clinton
7 : -)	Fred Flinstone
8 (: -)	Mouseketeer
= ^)	Dagwood Bumstead
- > = : -) X	Zippy the Pinhead
# : O + =	Betty Boop
3 : -)	Bart Simpson
> : *)	Bozo the Clown
B -)	Batman
= * O	Felix the Cat